伊豆大島 2013 年ラハールの堆積学的特徴：ラハール堆積物の粒度組成による分類

Sedimentary characteristics of the Izu-Oshima 2013 lahar: classification of various lahar deposits based on grain-size distribution

Abstract

山元孝広* 川辺禎久*

Takahiro Yamamoto and
Yoshihisa Kawanabe**

2014 年 3 月 20 日受付.

2014 年 6 月 7 日受理.

* 産業技術総合研究所活断層・火山研究部門
Geological Survey of Japan, AIST, Higashi
1-1-1 Central 7, Tsukuba 305-8567, Japan

Corresponding author: T. Yamamoto,
t-yamamoto@aist.go.jp

The Izu-Oshima 2013 lahar occurred on the western slope of Izu-Oshima volcano in response to heavy rain brought by the 26th Typhoon (WIPHA) on 16 October 2013. The lahar damaged Motomachi village, resulting in many fatalities. We immediately carried out field surveys and compared the grain-size distributions of this lahar deposit with those of various reference lahars, including the Unzen 1993, Pinatubo 1991-1995, Bandai 1888, Izu-Oshima S₂-c, Adataru-Sukawa L1, and Numazawa-Numazawako lahars. Based on the grain-size analysis, we divided these deposits into three types: cohesive mud flow, non-cohesive debris flow, and hyperconcentrated flood flow. The Izu-Oshima 2013 lahar deposit consists of moderately sorted, coarse- to medium-grained sand with pebbles and well-sorted fine- to very-fine-grained sand. The bi- and uni-modal grain-size distributions of this deposit suggest that the lahar was emplaced as a hyperconcentrated flood flow. This lahar was generated by a shallow-seated slope failure within ash fall deposits covering the Y5-stage collapse wall, and it cascaded turbulently down to Motomachi village at high speed.

Keywords: Izu-Oshima, Motomachi, 2013, lahar, grain size

はじめに

山地地形の卓越する日本では、斜面を構成する岩石や土砂などが重力によって下方に移動して生じるマスマーブメントが毎年のように発生し、生命や財産、生活基盤の損失など多大な被害を生じる災害となっている。このような土砂災害を引き起こすマスマーブメントには、地すべり・土石流・岩盤崩落など様々なタイプがあり、これは斜面を構成する地質の特性や、それがどの程度の水を含んでいたか、また斜面の勾配や移動経路の状況などによってその移動様式が変化する。特に火山地域では、噴火による火砕物の河川への過剰供給や植生の破壊、火山体斜面を構成する火山噴出物独自の地質特性、火山体特有の地形的な不安定さを反映して、より多様な土砂の移動現象が発生する。2013 年 10 月 16 日未明に伊豆大島火山の元町地域で発生した土砂災害は、その様な火山地域でのマスマーブメントの典型である。これは、台風 26 号の集中豪雨による斜面崩壊で生じたもので、死者・行方不明者 39 名などの被害が発生した。ただし、そのマスマーブメントの実態は、本論文で記述するように一部の報道で呼称された一般的な「土石流」とは異なるものであった。日本の法令上は「土石流」について、「山腹が崩壊して生じた土石等又は溪流の土石等が水と一体となって流下する自然現象」と定

義されている(土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律 2 条)。しかしながら、このような定義は、マスマーブメントの堆積学的な定義とは別物であり、法令上の「土石流」には様々な土砂の移動現象が含まれていることに注意しなければならない。

本論文では、水を媒介とする火山性碎屑物の流動現象である堆積物重力流(sediment gravity flow; Middleton and Hampton, 1973)をラハールと呼ぶ(早川, 1991; 山元, 1998; 鹿野, 2005)。ラハールの用語は、火山泥流とほとんど同じ意味で用いられる場合が多いが(例えば、地学団体研究会編, 1996, 新版地学事典, p.1365)、実際に火山泥流と呼ばれるものの中には、堆積学的に見ると泥質分を多く含み流体のマトリックス強度が比較的大きい粘着性(cohesive)の流れ(狭義の泥流: mud flow)以外に、非粘着性(noncohesive)の狭義の土石流(debris flow)や高密度洪水流(hyperconcentrated flood flow または hyperconcentrated streamflow)も含まれている(Smith, 1986; Palmer and Neall, 1991)。しかも、火山噴火に伴う大規模な火山性碎屑物の流動現象では、一つの現象内に様々な流れが混在することもあり(例えば、Best, 1992)、火山泥流という用語の曖昧さを避けるためにも、ここではラハールを用いる。また、土石流と掃流の中間的な流れである高密度洪水流は、例えば英語をカタカナ

Fig. 1. Index maps of Izu-Oshima (A and B) and distribution of the Izu-Oshima 2013 lahar in the western part of Izu-Oshima volcano (C). MB = Marutsukabashi; 1 = location of sample 1207; 2 = location of samples 1230 and 1238; Y5 = flank eruption of AD1338?; N4 = flank volcano of 1.5-ka eruption; S2 = flank volcano of 1.7-ka eruption.

表記にした片岡・中条(2000)のハイパーコンセンレイティッド流と同じものである。ここでは、hyperconcentratedを「高密度」と和訳した山元(1992, 1998)や原田(1999)に従っている。一方、工学分野では流れの力学的特性に基づき、広義の土石流は粘性土石流、礫石型土石流、乱流型土石流に分類されている(高橋・里深, 2002; 高橋, 2004)。その区分は概ね堆積物の特徴に基づく区分と合うものではあるが、実際の堆積物をもたらした流れが理論的な濃度式や抵抗則とどこまで一致するのかまではなお検討が必要である。

多様なラハールの特徴、特に流動時の粒子支持機構は、堆積物の粒度組成に表れている(Crandell, 1971; 山元, 1998)。そこで、本報告では伊豆大島 2013 年ラハールの地質学的背景を記載するとともに、その粒度組成を雲仙火山 1993 年ラハール、ピナツボ火山 1991–95 年ラハールなど主要なラハール堆積物と比較することで、多様なラハールの特徴を整理する。一般にラハール堆積物は、塊状で基質支持の火山灰・火山礫・火山岩塊からなる岩相(MF)、塊状もしくは逆級化した岩片支持で砂質基質を持つ礫からなる岩相(DF)、平行層理を持った礫混じりの砂からなる岩相(HFF)

Fig. 2. The main scarp of the Izu-Oshima 2013 slope failure along the Gojinka Sky Line. Pyroclastic fall deposits (ca. 1 m thick), that covered the Y_5 -stage agglutinate, collapsed by heavy rain on 16 October. The lahar cascaded down to the road surface, but did not damage the Sky Line.

Fig. 3. The Izu-Oshima 2013 lahar deposit near Marutsukabashi (2 in Fig. 1; 34.74776°N, 139.3603°E). This deposit consists of a lower 12-cm-thick unit and an upper 40-cm-thick unit; both are made up of normal-graded scoriaceous sand with basalt pebbles.

に大きく分けられ、岩相ごと粒度の特性を明らかにした。その上で、今回の元町 2013 年ラハールの特性について考察する。なお、粒度分析を行った試料の採取地点、タイプ、分析結果は Appendix 1 に示している。

伊豆大島 2013 年ラハールの地質学的背景

伊豆大島は玄武岩質マグマの噴出により形成された成層火山であり、溶岩流と降下火砕堆積物を主体とするテフラ層、側噴火による火砕丘などが山体を構成している。今回のラハール発生源は、伊豆大島西岸の元町背後の斜面で、元町から山頂カルデラ縁へ登る御神火スカイライン沿い、山頂カルデラ縁外側の新旧いくつかの側火山が分布する地域である (Fig. 1)。2013 年 10 月 16 日未明にこの斜面が台風 26 号

に伴う豪雨 (24 時間雨量 824 mm) により崩壊し、発生したラハールが神達地区をはじめ元町南部の大金沢沿いに流下し大きな被害をもたらした。

元町市街地は Y_5 期 (1338 年?) に噴出した元町溶岩の上に立地し、今回被害をもたらしたラハールの発生源および流路も、この元町溶岩および同じ噴火で噴出したスパター分布域とほぼ一致している (Fig. 1)。ただし、元町溶岩を噴出した Y_5 期側火口列の位置は火口地形が不明瞭なため研究者によって異なっていた (Nakamura, 1964; 一色, 1984; 川辺, 1998)。2000 年代に入って東京都が行った空中レーザー測量の結果、これまで推定されていた位置よりやや西側に 1 列の側火口列があることが判明した (Fig. 1)。この側火口列の位置は、以前から知られていた元町溶岩の分布、 Y_5 期ス

パターン分布と矛盾せず、また今回の斜面崩落に伴い現れた火口露頭(千葉達朗氏私信)からも Y_5 期側火口列として間違いないと考えられる。

Y_5 期側火口地形が判然とせず明瞭な火砕丘地形がない理由は、古い側火山の西側急斜面に火口が開いたため、火砕丘の大部分が噴火とほぼ同時に溶岩流とともに流れ去った、あるいは崩落したためと推定される。実際に今回の斜面崩壊を起こした斜面には、テフラに覆われた Y_5 期スパターが階段状滑落崖を形成していることが確認できる。同様の階段状滑落崖は 1983 年三宅島噴火、1986 年伊豆大島噴火でも斜面途中に開いた火口列で同じように形成されている(千葉ほか, 1988; 小林, 1984)。今回のラハール発生源の山体西斜面は、周辺の山体斜面に比べて 25 度以上の傾斜地が広がり、また谷分布密度が小さい。これは北西方向に伸びた古い側火山火砕丘の西側急斜面に開口した Y_5 期側火山が崩壊したあとの比較的新鮮な斜面をテフラが覆っていることが理由と考えられる。

Y_5 期側火山噴出物は、 Y_5 期以降の山頂噴火による淘汰のよい降下火山灰層と噴火休止期を示す土壤層からなる厚さ 1~2 m 程度の降下火砕物互層に覆われている。山頂火口西側であるため、降下火山灰層は粗粒~中粒砂サイズのスコリア質火山灰層が主体を占める。御神火スカイライン沿いのラハール発生斜面には、 Y_5 期スパター・溶岩流の上に多くの場所で Y_5 期の土壤層、それを覆う降下火砕堆積物互層がかなりの程度残っており、今回の斜面崩壊の崩壊深度は浅く、およそ 1 m 以下程度と見積もられる個所が多い(Fig. 2)。浸透した雨水によるパイピングホールが、淘汰のよい Y_4 期、 Y_1 期などの降下火山灰層に多く認められ、その直下の透水性の悪い土壤層との境界面で斜面崩壊を起こしたことがわかる。崩壊地の斜面の勾配は 35~40 度程度である。

代表的なラハール堆積物の粒度組成

堆積物の粒度分析は 1/2 mm の n 乗である ϕ スケールで示す粒径の違いに応じて以下の方法で行った。-6.0~-4.0 ϕ の粒子群については 0.5 ϕ 刻みのふるい分析を行い、各ふるいに残留した堆積物の重量比を計測した。但し、-6.0~-5.5 ϕ のふるい分析は試料採取時に野外において手作業で行い、ふるい分け試料をバネ秤で計量後、-5.0 ϕ 未満の試料を縮分して持ち帰った。そして、この-5.0 ϕ 未満の試料のふるい分析は室内で自動震とう機を用いて実施した。-6.5 ϕ 以上の粒子群については、露頭に 10 m の水平ラインを張り、ラインに重なる露頭面での最大径が-6.5 ϕ を超える粒子の最大粒径とその粒子のライン上の線分長を計測して、質量比を算出した。4.0 ϕ 未満の粒子群については、元町 2013 年ラハール堆積物を除き、沈降分析を行い、粒径加算曲線から 8.0 ϕ まで 0.5 ϕ 刻みの粒径分布を求めた。元町 2013 年ラハール堆積物については、Morphologi-G3(マルバーン社製)によるデジタル画像解析法(七山・古川, 2013)で 8.0 ϕ まで 0.5 ϕ 刻みの粒径分布を決定した。従って、厳密には-6.5 ϕ と 4.0 ϕ を境にして示される粒度分布の意味合いが異なるものの、その差は無視できるものとして異なる手法の

Fig. 4. Grain size distributions of the Izu-Oshima 2013 lahar deposit. Curve lines (GF) are Gaussian fits for subpopulations. Although the residual line (RS) still contains the coarsest subpopulation, the Gaussian curve is a poor fit to the residual. See Fig. 1 for locations of the sieved samples.

粒径分布を接合して、個々の試料の解析を行っている。さらに、個々の試料の粒度組成パターンの類型化には、Sheridan et al. (1987) の対数ガウス分布を仮定した複数モード解析を適用し、単峰分布型、双峰分布型、多峰分布型を区別している。ただし、最粗粒モードで非対称が著しいものについては、サンプリング時の粗粒粒子の取りこぼし、あるいは対数ガウス分布以外の粒径分布の可能性があるので、残差として表現している。

1. 伊豆大島 2013 年ラハール堆積物

2013 年 10 月 16 日未明に伊豆大島火山西斜面で発生し

Fig. 5. The Unzen 1993 lahar deposit at Fukae Town, Minami-Shimabara City (32.73923°N, 130.36747°E). The lower unit (HFF) is made up of discontinuous horizontally-bedded, moderately sorted sand and granules with pebbles. All clastics consist of dacite lithics derived from block and ash flow deposits. The upper unit (DF) is composed of clast-supported gravel with abundant sandy matrix.

Fig. 6. Grain size distributions of the Unzen 1993 lahar deposit. Curve lines (GF) are Gaussian fits for subpopulations. Although the residual line (RS) still contains the coarsest subpopulation, the Gaussian curve is a poor fit to the residual. The sieved samples were obtained in the Fukae trench site (Fig. 5).

たラハールは、発生源から海岸に向かう複数の直線的な流れからなる (Fig. 1)。崩壊地直下にはほとんど堆積物を残さず (Fig. 2)、その大半は山麓へと流下した。特に神達地区を襲った支流は、沢の斜面を乗り越え、山腹樹林帯を面状に広がり、流れに多量の木々を巻き込んだ。通過斜面にはガリー状の流路が新たに形成され、河床には元町溶岩が露出している。目撃者の談話では、ラハールは激しく波打つ濁流であったという。また、ラハールは建物 1 階部分を完全に浸水させたものの、その通過後には流された建物の基礎が確認できる程度の薄い堆積物しか残していない。

堆積物の試料採取はラハール発生翌日の 10 月 17 日 12 時頃に堆積域中央部の元町大金沢丸塚橋近くの 2 ヶ所で実施 (Fig. 1)、3 試料を解析した。堆積物は全て玄武岩の碎屑物から構成されている。このうち 1 試料 (1207) はラハール堆積域の南端付近、厚さ 2 cm 程度の堆積物、および 2 試料 (1230, 1238) は大金沢から溢流・堆積した丸塚橋南端 (Fig. 1 の MB 地点) の 2 フローユニットからなる堆積物のそれぞれ下位ユニット (厚さ 12 cm) と上位ユニット (厚さ 40 cm) である (Fig. 3)。丸塚橋南端の 2 試料は下部に最大径 5 cm ほどの火山礫を含み、いずれも正級化を示している。下位ユニット 1230 は、平均粒径 0.5ϕ の砂に中礫をやや多く含み、上部ユニット 1238 は平均粒径 1.2ϕ の砂に中礫を少量含む双峰分布型となっている (Fig. 4)。一方、縁辺部 1207 は平均粒径 3.3ϕ の砂・シルトからなる単峰分布型となっている。いずれの試料も 8.0ϕ 未満の粘土成分は 0.1% 以下と極めて乏しい。周辺地点でも堆積物を観察しているが、その岩相に大きな違いは認められない。

2. 雲仙 1993 年ラハール堆積物

1991 年から始まった雲仙普賢岳火山の溶岩ドームの形成では、ドームの成長に伴い溶岩塊が崩落して石質の火砕流が繰り返し発生した (Yamamoto et al., 1993)。さらに、火砕流が流れ下った水無川水系では豪雨の度に火砕流堆積物を母

Fig. 7. The Pinatubo 1994 lahar deposit in the Pasig River, Porac, Luzon Island (15.09851°N, 120.55862°E). This deposit consists of clast-supported, reverse-to-normally graded lithic gravel with abundant sandy matrix (DF) and discontinuous horizontally-bedded, moderately sorted crystalline-rich sand with pumiceous pebbles+granules (HFF). Samples PN107 and PN109 were taken from this outcrop. Scale is 2 m.

Fig. 8. Grain size distributions of the Pinatubo 1991-95 lahar deposit. Curve lines (GF) are Gaussian fits for subpopulations. The residual line (RS) still contains the coarsest subpopulation. See the Appendix for details of the sieved samples.

材としたラハールが発生し、下流域に氾濫している(例えば、池谷, 1993)。その中でも最大規模のものは1993年4月28日・5月2日の豪雨(28日雨量275 mm・02日雨量78.5 mm; 荒生ほか, 1997)で発生したラハール(流出土砂量102.5万 m^3)で、島原市南安徳町から南島原市深江町を中心とした300棟を超える家屋が被災した。この堆積物の観察と粒度分析・試料採取は同年12月に深江町の河川改修工事による掘削地で行っている。その後、この場所には道の駅ふかえと被災家屋保存公園が整備された。1993年ラハール堆積物の層厚は70~110 cmで、平行層理を持った中礫混じりの細礫・砂からなる下部(HFF)と、最大径105 cmの巨礫を含む岩片支持で砂質基質を持つ礫からなる上部(DF)で構成されている(Fig. 5)。また、1993年堆積物と旧地表の間には、侵食チャネルとこれを埋める平行層理を持つ中~細粒砂を挟んで、1992年8月のラハール堆積物(池谷・石川, 1992)が層厚40~70 cmで認められる。両ラハール堆積物を構成する碎屑物のほとんどは溶岩ドーム由来の石質デイスaitである。

1993年ラハール堆積物下部の平行層理を持つ中礫混じりの細礫・砂は、 $-2.0 \sim -0.5 \phi$ に平均粒径を持つ主成分と、 $1.0 \sim 3.0 \phi$ に平均粒径を持つ副成分からなる双峰分布型となっている(Fig. 6)。一方、上部の岩片支持の礫は、下部の細礫・砂に大礫・中礫からなる別の粒子群を加えた多峰分布型となっている(Fig. 6)。すなわち、上部の礫の基質の粒度組成は、下部の細礫・砂とほとんど違いがない。また、下部・上部とも 8.0ϕ 未満の粘土成分は0.5%以下である。下部には 3.0ϕ に平均粒径を持つ主成分と、 5.0ϕ に平均粒径を持つ副成分からなる細粒砂・シルトの薄層が挟まれるが、分布の形は細礫・砂とよく似た双峰分布型となっている。

3. ピナツボ 1991-95 年ラハール堆積物

フィリピンのピナツボ火山では、1991年6月の破局的な火砕流噴火(Scott et al., 1996)の直後から、降雨の度に周

Fig. 9. Grain size distributions of the Bandai 1993 lahar deposit (Yamamoto et al., 1999). Curve lines (GF) are Gaussian fits for subpopulations. Although the residual line (RS) still contains the coarsest subpopulation, the Gaussian curve is a poor fit to the residual. See the Appendix for details of the sieved samples.

Fig. 10. Grain size distributions of the Izu-Oshima S₂-c lahar deposit (Yamamoto, 2006). Curve lines (GF) are Gaussian fits for subpopulations. Although the residual line (RS) still contains the coarsest subpopulation, the Gaussian curve is a poor fit to the residual. See the Appendix for details of the sieved samples.

Fig. 11. The Adataru-Sukawa L1 lahar deposit at Nakano-sawa, Inawashiro Town (37.61573°N, 140.18769°E). This deposit consists of matrix-supported, ungraded, massive gravel with poorly sorted clay-rich matrix (MF). The underlying clast-supported, massive gravel (Gm) is a channel lag of normal stream deposits. Scale is 2 m.

Fig. 12. Grain size distributions of the Adataru-Sukawa L1 lahar deposit (Yamamoto, 1998). Curve lines (GF) are Gaussian fits for subpopulations. Although the residual line (RS) still contains the coarsest subpopulation, the Gaussian curve is a poor fit to the residual. Sample AD01 was obtained from the Nakanosawa outcrop (Fig. 11).

辺の谷を厚く埋めたデイサイト軽石流堆積物を母材としたラハールが頻発し、火砕流堆積範囲の下流域に広く土砂堆積氾濫域を出現させた (Pierson et al., 1996; Torres et al., 2004). 堆積物の観察と試料採取は 1995 年 1 月と 1996 年 2 月に東山麓の Abacan 川・Pasig 川、南西山麓の Marella 川、北麓の Odonell 川沿いで実施している。Pasig 川沿いのラハール堆積物については Torres et al. (2004) や PHIVOLCS の未公表資料で 1991 から 1995 年における年ごとの堆積物分布が特定されており、Appendix 1 の試料一覧には試料毎の発生時期を示している。それ以外の流域のラハール堆積物は発生時期が特定できていないので、1991–95 年堆積物と一

括している。観察したラハール堆積物については、発生時期毎に堆積物の岩相や粒径の違いは認められない。Fig. 7 はその岩相の代表的なもので、岩片支持で砂質の基質を持つ石質の大礫・中礫 (DF) と、連続性の悪い平行層理の発達した軽石細礫混じりの結晶片に富む砂 (HFF) の互層からなる。各地の露頭では、ラハール堆積物中にチャンネル状に削り込んで堆積した塊状の円磨された軽石大礫・中礫やトラフ型斜交層理を持つ砂がしばしば挟まれるが、これらはラハール氾濫後に形成された河川流堆積物である。このような岩相は、土石流・高密度洪水流・河川流堆積物を区別した Pierson et al. (1996) の記載と基本的に一致している。

Fig. 13. The Numazawa-Numazawako lahar deposit at Katamon, Aizu-Bange Town (37.57241°N; 139.75973°E). This lahar deposit is made up of discontinuous horizontally-bedded or low-angle-crossbedded, moderately sorted sand. Alternating coarse and fine layers of coarse crystal-rich sand + fine lapilli pumice and coarse to very coarse sand. Individual beds are reversely graded. This facies represents a typical hyperconcentrated flood flow deposit.

ラハール堆積物の石質大礫・中礫(DF)の粒度組成パターンは、平均粒径が $0.0 \sim 1.5 \phi$ の砂を副成分に持つ多峰型で、シルトに更に小さな副成分を伴うものもあるが(Fig. 8), 8.0ϕ 未満の粘土成分は 0.5% 以下である。平行層理を持つ砂(HFF)は多くが $1.0 \sim 2.5 \phi$ に平均粒径を持つ結晶質の砂を主成分に、軽石や石質岩片の中礫・細礫を副成分に持つ双峰分布型となっている(Fig. 8)。HFF も 8.0ϕ 未満の粘土成分は 0.5% 以下と少ない。

4. 磐梯 1888 年ラハール堆積物

福島県の磐梯火山 1888 年 7 月 15 日の水蒸気爆発では、山体崩壊に続く噴火後半に約 5,000 m まで上昇した噴煙から火山灰混じりの豪雨が降り注ぎ、東山腹の琵琶沢沿いをラハールが流下した(Sekiya and Kikuchi, 1890)。その水平流下距離は約 4 km で、垂直落差は約 700 m であった。東山麓の磐梯国際スキー場(現在はファミリースノーパークばんだい×2)での 1992 年トレンチ掘削で確認された本ラハール堆積物は、層厚 180~200 cm の塊状で基質支持の火山灰・火山礫・火山岩塊からなる(Yamamoto et al., 1999)。碎屑物は全て石質の安山岩で、本質物は含まれていない。ラハール堆積物の下位には 1888 年噴火初期に発生した火砕物重力流堆積物と泥質の降下火砕堆積物があり、これらに遅れてラハールが発生したことが、その層序から指摘できる。ラハール堆積物は基質の色調が明灰色の下部と褐灰色の上部ユニットからなるが、どちらの堆積物も 8ϕ 未満の粘土成分に富み(10 wt.% 前後)、淘汰が悪い(標準偏差; 2.7~3.4)。また、粒度組成のパターンは典型的な多峰型である(Yama-

Fig. 14(←). Grain size distributions of the Numazawa-Numazawako lahar deposit. Curve lines (GF) are Gaussian fits for subpopulations. Although the residual line (RS) still contains the coarsest subpopulation, the Gaussian curve is a poor fit to the residual. See the Appendix for details of the sieved samples.

Fig. 15. Gain-size characteristics of various lahar deposits. M and σ are the arithmetic mean diameter and standard deviation in phi units, respectively. The lahar deposits plot in three distinctive fields; mud flow, debris flow (DF) and hyperconcentrated flood flow (HFF). Izu-Oshima 2013 lahar = this study; Unzen 1993 lahar = this study; Pinatubo 1991–95 lahar = Yamamoto (1998); Bandai 1888 lahar = Yamamoto et al. (1999); Izu-Oshima S₂-c lahar = Yamamoto (2006); Adatara-Sukawa L1 lahar = Yamamoto (1998); Numazawako lahar = this study; stream flow of the Tadami River = this study.

moto et al., 1999; Fig. 9).

5. 伊豆大島 S₂-c ラハール堆積物

本ラハールは、伊豆大島火山で AD340 年頃に起きたカルデラ形成期の S₂ 噴火の水蒸気爆発に伴い発生したもので、北西～南東山腹の複数の谷地形沿いに流下した(山元, 2006). S₂ 噴火は、山腹・山頂マグマ噴火から水蒸気爆発を経て破局的カルデラ陥没へと至る一連の噴火活動とされている(Nakamura, 1964). S₂-c ラハール堆積物は、S₂-b の水蒸気爆発降下堆積物と S₂-d の火砕物重力流堆積物の間に挟まれるものであるが、その発生の誘因が磐梯火山 1888 年噴火のような噴煙からの降雨によるものか、噴火とは独立した降雨によるものかは不明である(山元, 2006). このラハール堆積物の層厚は西山麓の元町から野増で特に大きく、最大で 5 m 以上である。堆積物は塊状で、基質支持の火山灰・火山礫・火山岩塊からなる。碎屑物は多様な発泡度や色調の玄武岩からなる。堆積物の基底部には、樹木や土壌・降下火砕物の塊が偽礫として取り込まれている。土壌・降下火砕物の塊は剪断変形により薄く引き延ばされ、基質中で縞状の構造を作っている。また、含まれる岩片や木片の長軸が示すファブリックは、ランダムであった(山元, 2006). ラハール堆積物は 8φ 未満の粘土成分に富み(5 wt.% 前後)、淘汰が悪い(標準偏差; 3.0~3.4). また、粒径分布のパターンは、典型的な多峰型である(Fig. 10; 山元, 2006).

6. 安達太良酸川 L1 ラハール堆積物

本ラハールは、福島県の安達太良火山沼ノ平火口で BC400~BC760 年頃に起きた沼ノ平 6 噴火(山元・阪口, 2000)に伴い発生したもので、西山腹の酸川沿いに水平距離約 10 km、垂直落差約 850 m を流下した(山元, 1998). その体積は、 $8 \times 10^6 \text{ km}^3$ に達する。酸川源頭部にはラハールの母材となった温泉変質の進んだ安山岩が露出するほか、給

源の沼ノ平火口底には 1900 年噴火で形成されたような火口湖があり、これが水蒸気爆発で決壊して大規模なラハールが発生したものと考えられている(山元, 1998). 西山麓のこのラハール堆積物は、層厚 2~5 m の塊状で基質支持の火山灰・火山礫・火山岩塊からなる(Fig. 11). 最大径約 2 m の安山岩塊がまばらに含まれるほか、最大径 60 cm の樹木片も含まれている。堆積物は 8φ 未満の粘土成分に富み(5 wt.% 前後)、淘汰が極めて悪い(標準偏差; 3.5~4.0). また、粒径分布のパターンは解析上、多峰型となるものの、実際には基質部分の粒度組成には粒径毎の頻度の偏りがほとんど見られない(Fig. 12; 山元, 1998).

7. 沼沢沼沢湖ラハール堆積物

本ラハールは、福島県会津地域の沼沢火山で BC3400 年頃に起きた沼沢湖火砕流噴火(山元, 1995; 2003)に伴い発生したもので、只見川を始めとした河川に堆積したデイスイト軽石流堆積物がその後の降雨や堰き止め湖の決壊などにより大規模なラハールとなり、河川氾濫を起こしながら最下流の新潟平野にまで広がったものである(Kataoka et al., 2008). このラハールは、沼沢火山から約 30 km 下流の会津坂下町片門では、基底部に岩片支持で砂質の基質を持つ石質の大礫・中礫、塊状でやや淘汰の悪い結晶片に富む砂からなる下部と、侵食面を持ってこれを覆う連続性の悪い平行層理—低角斜交層理の発達した軽石細礫・中礫混じりの結晶片に富む砂からなる上部(Fig. 13)で構成され、全層厚は 20 m に及ぶ。また、成層した個々の単層には逆級化が認められる。片門より下流では下部は削剥され観察できなくなり、上部も徐々に細粒化していく。上部の成層した砂には、円磨された軽石大礫・中礫の濃集層がレンズに挟まれることがある。このような部分には長軸が流れに直交するインプリケーションが顕著に発達しており、ラハールからは堆積でき

なかった軽石群が減衰時に河川流として定置したものと見られる。沼沢湖ラハール堆積物がつくる段丘は、只見川の河川堆積物である塊状の円礫やトラフ型斜交層理を持つ砂・礫からなる最低位段丘堆積物により削り込まれている(山元ほか, 2006)。

ラハール堆積物の石質大礫・中礫の粒度組成パターンは、平均粒径が $1.0 \sim 1.5 \phi$ の砂を副成分に持つ多峰型である(Fig. 14)。平行層理を持つ砂は $1.0 \sim 2.0 \phi$ に平均粒径を持つ結晶片に富む砂を主成分に軽石質の細礫を副成分に持つ双峰分布型と、 $2.0 \sim 3.5 \phi$ に平均粒径を持つ単峰分布型からなる(Fig. 14)。単峰分布型の結晶片に富む砂は沼沢火山から 45 km 以上の下流域に多く現れる。ほとんどの試料は、 8.0ϕ 未満の粘土成分は 0.5% 以下と少ないものの、平均粒径が 3.5ϕ 以下の一部のものにはシルトの小さな副成分を持つものがあり、このようなものは若干淘汰が悪くなる。比較のために最低位段丘を構成する只見川の河川堆積物(山元ほか, 2006)の粒度分析も実施しているが、ほとんどのラハール堆積物よりも淘汰が良い。ただし、下流部に現れる一部の細粒な単峰分布型のラハール堆積物の砂は、河川堆積物の砂と粒度組成の特徴からは区別することが出来ない。また、ラハール堆積物中の軽石大礫・中礫濃集層については、粒度分析をしていない。

考 察

1. 粒度組成によるラハール堆積物の区分

粒度組成の評価の指標には平均粒径(M)－標準偏差(σ)図が有効で、上記の代表的ラハール堆積物は、図上のいくつかの領域に分かれプロットされる(Fig. 15)。特に、流動時の粒子支持機構に大きな影響を与える粘土成分の存在の有無は、流体のマトリックス強度が比較的大きい粘着性ラハール(狭義の泥流)と、非粘着性ラハール(狭義の土石流や高密度洪水流)との仕切りとなっている(Crandell, 1971; 山元, 1998)。前者は磐梯 1888 年ラハール、伊豆大島 S_2 -c ラハール、安達太良酸川 L1 ラハールであり、平均粒径の割に淘汰が悪い(σ が大きい)領域にまとまってプロットされている。いずれのラハールもその発生推移から、水蒸気爆発と関連していることは明らかである。すなわち、熱水変質を受けた粘土質の火砕物の放出・堆積、もしくは熱水変質を受けた火山体の崩壊が泥流の発生に結びついたものであり、母材の元々の特徴が流れの性質を決めている。反対に粘土成分の乏しい雲仙 1993 年ラハールやピナツボ 1991–95 年ラハール、沼沢沼沢湖ラハールは非粘着性ラハールに分類され、M– σ 図では同じ領域に重なってプロットされる(Fig. 15)。これらはいずれもマグマ噴火で発生した火砕流堆積物が豪雨や堰止め湖の決壊で再移動したもので、堆積物は定置前の流動過程で分級を受けていること、熱水変質を被っていないなど、やはり母材の特徴が現れている。

狭義の土石流と高密度洪水流の違いは、前者では礫同士の衝突が卓越する集合運搬形式で流れるのに対して、後者では濃度の高い浮流や掃流などの各個運搬形式が卓越する点にある(例えば、Smith, 1986)。また、両者はしばしば一つの流

動現象の中に共存し、流れの先端部分では石質の礫が集中して土石流、後方では徐々に粒子濃度と粒径が減少して高密度洪水流となる場合(Sohn et al. 1999; Kataoka and Nakajo, 2004)や、土石流が河川を流れるうちに希釈され高密度洪水流へと変化する場合(Pierson and Scott, 1985)もある。今回報告した石質火砕流起源の雲仙 1993 年ラハールや、軽石流起源のピナツボ 1991–95 年ラハール・沼沢沼沢湖ラハールでも、岩片支持の礫濃集部(DF)と平行層理－低角斜交層理を持つ礫混じりの砂(HFF)の二つの岩相が確認でき、その粒度組成も前者が多峰分布型、後者が双峰分布型と異なり、かつ M– σ 図でも異なる領域に分かれている。前者の多峰分布型において、最も粗粒側のモードは粗粒側に偏った非対称な分布を示しており(Figs. 6, 8, 14)、対数ガウス分布よりは岩石破砕に特有のロジック・ラムラー分布(水谷, 1989)に近いものとみられる。一方、双峰分布型の二つのモードは(Figs. 6, 8, 14)、粗粒側が掃流、細粒側が高濃度の浮流による各個運搬によるものと解釈できよう。また、後者を特徴付ける逆級化構造を持つ成層構造は(Figs. 7, 13)、高密度混濁流堆積物にしばしば認められる流れの底に粒子が沈積して形成されたトラクションカーペット(Lowe, 1982)が癒着して出来たものである。以上のことから、これらのラハールも、土石流(DF)と高密度洪水流(HFF)の両者が共存する流れであったことが指摘できる。しかも、氾濫域の末端で観察された雲仙 1993 年ラハールのように高密度洪水流が先に到達していることは、高密度洪水流の方がより流動性に富み、土石流から分離後も更に薄く広がり得ることを示唆している。また、ピナツボ 1991–95 年ラハールや沼沢沼沢湖ラハールは、雲仙 1993 年ラハールとは異なり軽石を多く含むが、粒子密度の効果が大きい粒径の大きい軽石はラハール本体からは分離した、流れの減衰時のユニットとして定置していることが多い。

2. 2013 年伊豆大島ラハールの流動機構

今回の伊豆大島 2013 年ラハールは、堆積物の粒度組成の M– σ 図での位置(Fig. 15)や双峰分布型～単峰分布型(Fig. 4)である特徴から、典型的な高密度洪水流であったと判断できる。すなわち、今回の伊豆大島元町での土砂災害の最大の特徴は、巨礫の濃集した一般的な土石流による災害ではないことにある。その理由は、 Y_5 期以降の山頂噴火による淘汰のよい降下火山灰層と土壌層からなる降下火砕物互層が表層崩壊を起こした今回の斜面崩壊の地質条件にある。浸透した雨水で飽和した火山灰層は直ちに流動化し、発生時点から高密度洪水流を形成した。通常の斜面崩壊のような固体ではなく、流体として出発したため、高速で面状に広がり下流域まで到達したのと考えられよう。巨礫を含まない分その破壊力は土石流よりは小さかったであろうが、乱流として樹林帯斜面を流れ下ったため表土が洗掘され取り込まれた大量の樹木が下流の家屋に大きな被害を与える結果となった。元町市街地は Y_5 期の溶岩流と直後に発生した土石流堆積物の上にあることから、当然、土石流災害は想定され、市街地背後にある土石流危険渓流に対しては各種砂防施設が施工されていた。しかしながら、今回の斜面崩壊で発生したラハールは

通常の土石流対策では防ぎきれないタイプのものではあった。ただし、今回のようなラハールは火山地域では普通に起こるものであり、2012 年 7 月の熊本県阿蘇市土砂災害もカルデラ壁の急斜面を覆っていた中岳火山の降下火山灰が流動化して発生したもので(宮縁, 2012), 2013 年 12 月に観察した崩壊地点直下の堆積物は今回の元町のものと同様に類似していた。また、富士火山宝永(AD1707 年)噴火では、降下堆積物が積もった神奈川県山間部で、降雨の度に宝永火砕物の再移動による土砂災害が頻発した(井上, 2007)。今後の火山地域での防災計画を立案する上では、これらの事例を念頭に置いた幅広い対策が求められよう。

ま と め

代表的なラハール堆積物(伊豆大島 2013 年, 雲仙 1993 年, ピナツボ 1991–95 年, 磐梯 1888 年, 伊豆大島 S_2 -c, 安達太良酸川 L1, 沼沢沼沢湖ラハール)の粒度分析結果を取りまとめた。その結果、平均粒径・標準偏差の関係、粒径の分布型の違いから、粘着性の泥流堆積物、非粘着性の土石流堆積物と高密度洪水流堆積物の 3 タイプが識別できた。泥流は粘土成分を多く含む流体のマトリックス強度が比較的大きい流れで、磐梯 1888 年, 伊豆大島 S_2 -c, 安達太良酸川 L1 ラハールが分類される。また、土石流(狭義)は礫同士の衝突が卓越する集合運搬形式の流れ、高密度洪水流は濃度の高い浮流と掃流の各個運搬形式の流れで、雲仙 1993 年, ピナツボ 1991–95 年, 沼沢沼沢湖ラハールでは両者が共存している。

伊豆大島 2013 年ラハールは、伊豆大島火山カルデラ縁西斜面にある Y_5 期側火口列の急斜面で発生したもので、この斜面を被覆していた Y_4 期以降の降下細粒火山灰層が 10 月 16 日未明の台風 26 号豪雨で表層崩壊を起こしたものである。発生したラハールは元町の神達地区をはじめ市街地南部の大金沢沿いに流下し大きな被害をもたらした。ラハール堆積物の粒度組成の特徴は、この流れが高密度洪水流であったことを示しており、土石流のような巨・大礫が集合したものではなかったことが今回の土砂災害の大きな特徴である。すなわち、今回のラハールは斜面崩壊発生時から流体として流れ出したため、斜面を面状に高速で流れ下ったものとみられる。この種の土砂災害は、他火山でも発生事例があり、防災上考慮しておく必要がある。

謝 辞

東京都建設局河川部には空中レーザー測量データの使用を許可していただいた。10 月 17 日の現地調査には株式会社テレビ朝日に便宜を払っていただいた。その後の調査では大島町役場、気象庁伊豆大島火山防災連絡事務所、伊豆大島ジオパーク推進委員会の協力を得た。また、Morphologi-G3 による試料の粒度分析では、(独)産業技術総合研究所の古川竜太博士の手を煩わせた。同所七山 太博士には、原稿に目を通して頂き有益な意見を多く頂いた。原稿の不備は、編集者と査読者の適切な指摘で改善された。以上の方々に心より感謝いたします。なお、分析に用いた Morphologi-G3 は、(独)日本原子力研究開発機構からの平成 24 年度委託研究「火

山噴火ハザード評価手法の開発」で購入したものである。

文 献

- 荒生公雄・中根重勝・岩崎博之・藤吉康志・武田喬男(Arao, K., Nakane, S., Iwasaki, H., Fujiyoshi, Y. and Takeda, T.), 1997, 雲仙岳に大規模な土石流を発生させた豪雨の特徴. 自然災害科学(*Jour. Japan Soc. Natl. Disaster. Sci.*), **16**, 27–40.
- Best, J. L., 1992, Sedimentology and event timing of a catastrophic volcanoclastic mass flow, Volcan Hudson, Southern Chile. *Bull. Volcanol.*, **54**, 299–318.
- 千葉達朗・遠藤邦彦・太刀川茂樹・谷口英嗣(Chiba, T., Endo, K., Tachikawa, S. and Taniguchi, H.), 1988, 伊豆大島 1986 年噴火の溶岩流. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **33**(伊豆大島噴火特別号), S52–S63.
- 地学団体研究会編(Assoc. Geol. Collab. Japan, ed.), 1996, 新版地学事典(*The Dictionary of Geological Science; New ed.*). 平凡社(Heibonsya), 1443p.
- Crandell, D. R., 1971, Postglacial lahars from Mount Rainier Volcano, Washington. *U. S. Geol. Surv., Prof. Pap.*, **677**, 75p.
- 早川由紀夫(Hayakawa, Y.), 1991, 火山で発生する流れとその堆積物—火砕流・サージ・ラハール・岩なだれ. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **36**, 357–370.
- 原田憲一訳(Fritz, W. J. and Moore, J. N., translated by Harada, K.), 1999, 層序学と堆積学の基礎(*Basics of Physical Stratigraphy and Sedimentology*). 愛智出版(AICHI Shuppan), 386p.
- 池谷 浩(Iketani, H.), 1993, 雲仙・水無川の土石流発生機構について. 砂防学会誌(*Jour. Japan Soc. Erosion Control Engin.*), **46**, 15–21.
- 池谷 浩・石川芳治(Iketani, H. and Ishikawa, Y.), 1992, 1992 年 8 月雲仙普賢岳に発生した土石流(速報). 砂防学会誌(*Jour. Japan Soc. Erosion Control Engin.*), **45**, 52–56.
- 井上公夫(Inoue, K.), 2007, 富士山宝永噴火(1707)後の長期間に及んだ土砂災害. 荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道編, 富士火山(*Fuji Volcano*). 山梨県環境科学研究所(Yamanashi Inst. Environment. Sci.), 427–439.
- 一色直記(Issiki, N.), 1984, 大島地域の地質(*Geology of the Oshima District. Quadrangle Series, 1: 50,000*). 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 133p.
- 鹿野和彦(Kano, K.), 2005, 火山を発生源とする重力流の流動・定置機構. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **50**(特別号), S253–S272.
- 片岡香子・中条武司(Kataoka, K. and Nakajo, T.), 2000, 鮮新・更新統東海層群中の恵比須峠—福田テフラ(嘉例川火山灰)における土石流—ハイパーコンセンストレイティッド流堆積物の堆積過程. 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **106**, 897–900.
- Kataoka, K. and Nakajo, T., 2004, Flow transformation and depositional organization of debris flow-hyperconcentrated flow-streamflow spectrum in volcanic fan-delta setting. *Jour. Sediment. Soc. Japan*, **59**, 17–26.
- Kataoka, K. S., Urabe, A., Manville, V. and Kajiya, A., 2008, Breakout flood from an ignimbrite-dammed valley after the 5 ka Numazawako eruption, northeast Japan. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **120**, 1233–1247.
- 川辺禎久(Kawanabe, Y.), 1998, 伊豆大島火山地質図(*Geological Map of Izu-Oshima Volcano*). 火山地質図, 10, 地質調査所(Geol. Surv. Japan).
- 小林哲夫(Kobayashi, T.), 1984, 1983 年 10 月三宅島噴火の溶岩とスコリア丘の地形. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **29**(三宅島噴火特別号), S221–S229.
- Lowe, D. R., 1982, Sediment gravity flows. II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Jour. Sediment. Petrol.*, **52**, 279–297.
- Middleton, G. V. and Hampton, M. A., 1973, Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition. In Middleton, G.

- V. and Bouma, A. H., eds., *Turbidites and Deep-water Sedimentation*. Soc. Econ. Paleont. Mineral., Pacific Section, 1–38.
- 宮縁育夫(Miyabuchi, Y.), 2012, 阿蘇カルデラにおいて 2012 年 7 月の九州北部豪雨によって発生した斜面崩壊. 地学雑誌(*Jour. Tokyo Geogr. Soc.*), **121**, 1073–1080.
- 水谷 仁(Mizutani, H.), 1989, 岩石の破壊による粒子のサイズ分布. 地学雑誌(*Jour. Tokyo Geogr. Soc.*), **98**, 696–702.
- Nakamura, K., 1964, Volcano-stratigraphic study of Oshima Volcano, Izu. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. of Tokyo*, **42**, 649–728.
- 七山 太・古川竜太(Nanayama, F. and Furukawa, R.), 2013, デジタル画像解析法を用いた新しい粒度分析の現状と課題. 日本地質学会第 120 年学術大会講演要旨(120th Ann. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.), 79.
- Palmer, B. A. and Neall, V. E., 1991, Contrasting lithofacies architecture in ring-plain deposits related to edifice construction and destruction, the Quaternary Stratford and Opunake Formations, Egmont Volcano, New Zealand. *Sediment. Geol.*, **74**, 71–88.
- Pierson, T. C., Daag, A. S., Reyers, P. J. D., Regalado, Ma. T. M., Solidum, R. U. and Tubianosa, B. S., 1996, Flow and deposition of posteruption hot lahars on the east side of Mount Pinatubo, July–October 1991. In Newhall, C. G. and Punongbayan, R. S., eds., *Fire and Mud. Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Univ. Washington Press, 921–950.
- Pierson, T. C. and Scott, K. M., 1985, Downstream Dilution of a Lahar: Transition From Debris Flow to Hyperconcentrated Streamflow. *Water Resources Res.*, **21**, 1511–1524.
- Scott, W. E., Hoblit, R. P., Torres, R. C., Self, S., Martinez, M. M. L. and Nillos, Jr., T., 1996, Pyroclastic flows of June 15, 1991, climatic eruption of Mount Pinatubo. In Newhall, C. G. and Punongbayan, R. S., eds., *Fire and Mud. Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Univ. Washington Press, 921–950.
- Sekiya, S. and Kikuchi, Y., 1890, The Eruption of Bandai-san. *Jour. Coll. Sci., Imperial Univ., Japan*, **3**, 91–172.
- Sheridan, M. F., Wholetz, K. H. and Dehn, I., 1987, Discrimination of grain-size subpopulations in pyroclastic deposits. *Geology*, **15**, 367–370.
- Smith, G. A., 1986, Coarse-grained nonmarine volcanoclastic sediment: Terminology and depositional process. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **97**, 1–10.
- Sohn, Y. K., Rhee, C. W., Kim, B. C., 1999, Debris flow and hyperconcentrated flood-flow deposits in an alluvial fan, northwestern part of the Cretaceous Yongdong Basin, Central Korea. *Jour. Geol.*, **107**, 111–132.
- 高橋 保(Takahashi, T.), 2004, 土石流の機構と対策(*Debris Flow Mechanisms and Measures*)*: 地質・砂防・土木技術者/研究者のためのニュー・フィールド・サイエンス・シリーズ vol.2, 近未来社(Kinmirai-sya), 432p.
- 高橋 保・里深好文(Takahashi, T. and Satofuka, Y.), 2002, 石礫型及び乱流型土石流の一般理論とその実用化モデル. 砂防学会誌(*Jour. Japan Soc. Erosion Control Engin.*), **55**, 33–42.
- Torres, R., Mougini-Mark, P., Self, S., Garbeil, H., Kallianpur, K. and Quiambao, R., 2004, Monitoring the evolution of the Pasig-Potrero alluvial fan, Pinatubo Volcano, using a decade of remote sensing data. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **138**, 371–392.
- 山元孝広(Yamamoto, T.), 1992, 会津盆地, 塔寺層の火山性碎屑物堆積相から見た砂子原カルデラ火山の中期更新世火山活動. 地質雑誌(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **98**, 855–866.
- 山元孝広(Yamamoto, T.), 1995, 沼沢火山における火砕流噴火の多様性: 沼沢湖および水沼火砕堆積物の層序. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **40**, 67–81.
- 山元孝広(Yamamoto, T.), 1998, 安達太良火山西山麓の完新世酸川ラハール堆積物. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **43**, 61–68.
- 山元孝広(Yamamoto, T.), 2003, 東北日本, 沼沢火山の形成史: 噴出物層序, 噴出年代及びマグマ噴出量の再検討. 地調研報(*Bull. Geol. Surv. Japan*) **54**, 323–340.
- 山元孝広(Yamamoto, T.), 2006, 伊豆大島火山, カルデラ形成期の火砕物密度流堆積物: 差木地層 S₂ 部層の層序・岩相・年代の再検討. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **51**, 257–271.
- Yamamoto, T., Nakamura, Y. and Glicken, H., 1999, Pyroclastic density current from the 1888 phreatic eruption of Bandai volcano, NE Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **90**, 191–207.
- 山元孝広・阪口圭一(Yamamoto, T. and Sakaguchi, K.), 2000, テフラ層序からみた安達太良火山, 最近約 25 万年間の噴火活動. 地質雑誌(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **106**, 865–882.
- Yamamoto, T., Takarada, S. and Suto, S., 1993, Pyroclastic flows from the 1991 eruption of Unzen volcano, Japan. *Bull. Volcanol.*, **55**, 166–175.
- 山元孝広・吉岡敏和・牧野雅彦・住田達哉(Yamamoto, T., Yoshio-ka, T., Makino, M. and Sumita, T.), 2006, 喜多方地域の地質(*Geology of the Kitakata District. Quadrangle Series, 1: 50,000*). 産総研地質調査総合センター(Geol. Sur. Japan, AIST). 63p.

* English translation from the original written in Japanese.

以下の Appendix は, オープンファイルとして学会ホームページ上で公開しています. <<http://www.geosociety.jp/publication/content0006.html>>

Appendix 1. Sample list.

(要 旨)

山元孝広・川辺禎久, 2014, 伊豆大島 2013 年ラハールの堆積学的特徴: ラハール堆積物の粒度組成による分類. 地質雑, **120**, 233–245. (Yamamoto, T. and Kawanabe, Y., 2014, Sedimentary characteristics of the Izu-Oshima 2013 lahar: classification of various lahar deposits based on grain-size distribution. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **120**, 233–245.)

ラハール堆積物は, 平均粒径－標準偏差の関係, 粒径の分布型の違いから, 粘着性の泥流堆積物, 非粘着性の土石流堆積物と高密度洪水流堆積物の 3 タイプに識別することが出来る. 2013 年 10 月 16 日未明に伊豆大島で発生したラハールは, 伊豆大島火山西斜面を被覆していた降下細粒火山灰層が表層崩壊を起こしたもので, 堆積物の粒度組成の特徴は, この流れが高密度洪水流であったことを示している. すなわち, 土石流のような巨・大礫が集合したものではなかったことが今回の土砂災害の大きな特徴となっている. 今回のラハールは斜面崩壊発生時から流体として流れ出したため, 斜面を面状に高速で流れ下ったものとみられる. この種の土砂災害は, 他火山でも発生事例があり, 防災上考慮しておく必要がある.

科学論文では, 学説の検証可能性を保証することが重要です. そのため, 地質学雑誌掲載論文には, 重要な証拠となった試料がどこで得られたかを示しているものがあります. 言うまでもないことですが, 見学や採取を行う場合, 各自の責任において地権者や関係官庁への連絡と許可の取得の必要があることにご注意下さい. 詳しくは, 次のページをご覧ください.

<http://www.geosociety.jp/publication/content0073.html>